

УДК 681.518

А.М. Скаковська<sup>1</sup>, О.С. Радивоненко<sup>2</sup><sup>1</sup> Сумський державний університет, Суми<sup>2</sup> Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків**МЕТОД АДАПТИВНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ ЕЛЕКТРОННО-ОПТИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ**

*Розглядається метод адаптивного розпізнавання електронно-оптичних зображень, що дозволяє підвищити ефективність функціонування систем розпізнавання шляхом класифікаційного настроювання електронно-оптичної системи без участі людини-оператора.*

**Ключові слова:** електронно-оптичне зображення, розпізнавання, класифікація.

**Вступ**

Технологічний процес настроювання електронно-оптичної системи на необхідні параметри для конкретного дослідження характеризується складною взаємодією оператора з технологічним об'єктом дослідження. Процес керування електронно-оптичною системою значно ускладнюється необхідністю збору й обробки великого обсягу інформації про технічний стан об'єкта дослідження. Порівняльний аналіз методів розпізнавання електронно-оптичних зображень показав, що існуючі методи не дозволяють враховувати усіх факторів суб'єктивного управління такими системами, що є причиною високої ітеративності процесу навчання [1].

Основним недоліком відомих методів розпізнавання зображень є відсутність у процесі навчання корекції вхідного математичного опису з метою урахування індивідуальних властивостей об'єкту дослідження і побудови високоточних класифікаторів. Отже, актуальною науковою задачею є створення методу розпізнавання електронно-оптичних зображень, що дозволить адаптувати вхідний математичний опис системи, що навчається, в умовах апріорної невизначеності, нечіткої компактності реалізацій образу й мінімального обсягу репрезентативної навчальної вибірки, що забезпечить автоматичну класифікацію функціональних станів системи по нечіткій навчальній матриці з достатньо високою точністю.

**Постановка задачі.** Кінцевим етапом електронно-оптичного дослідження є одержання якісного зображення досліджуваного зразка. Тому головним завданням оператора є одержання максимально різкого зображення, що при даній роздільній здатності приладу визначається якістю фокусування. Зображення є точно сфокусованим, коли область зондування пучком на зразку (беручи до уваги вплив області взаємодії, внесок якої в область зондування зразка може бути основним) менше, ніж розмір елемента зображення.

Нехай  $X_H^0$  – клас, який характеризує найвище значення критерію функціональної ефективності  $R_{\max}$  електронно-оптичної системи, яке забезпечує сфокусоване зображення. Дано вектор параметрів настройки  $g = \langle g_1, \dots, g_l, \dots, g_L \rangle$ , відповідні обме-

ження на них  $R_l(g_1, \dots, g_L) \leq 0$  і клас  $X_O$ , який характеризує початкове розфокусоване зображення, що приймається за базове. Треба у межах заданої оперативності за  $S$  кроків настройки перевести електронно-оптичну систему із класу  $X_O$  в клас  $X_H^0$  за умови досягнення максимального значення критерію функціональної ефективності  $E_{\max} = \max_{\{s\}} E$  і

визначення екстремального значення параметра  $g_l$  за умови, що параметри  $\langle g_2, \dots, g_l, \dots, g_L \rangle \in G_H$ , де  $G_H$  – нормована область параметрів настройки.

**Теоретичні та методологічні положення**

На відміну від відомих методів класифікації, орієнтованих на реалізацію оптимальних алгоритмів обробки даних, метод адаптивного розпізнавання зображень дозволяє в рамках алгоритму дискримінантного типологічного аналізу оптимізувати в інформаційному сенсі параметри, що впливають на індивідуальні властивості функціонування системи розпізнавання зображень – систему контрольних допусків на ознаки розпізнавання та радіус контейнера простору ознак розпізнавання.

Синтез адаптивної системи розпізнавання електронно-оптичних зображень полягає в категорійному моделюванні, адаптації вхідного математичного опису, ітеративній процедурі розпізнавання та аналізі функціонального стану системи. На рис. 1 запропоновано загальну схему методу адаптивного розпізнавання електронно-оптичних зображень.

Розв'язання задачі класифікаційної настройки електронно-оптичної системи складається з двох етапів. На першому етапі на кожному кроці настроювання системи здійснюється максимізація інформаційного критерію функціональної ефективності, який розглядається як міра різноманітності між базовим  $X_O$  і поточним  $X_S$  класами функціонального стану електронно-оптичної системи, шляхом ітеративної процедури побудови оптимальної (тут і далі в інформаційному сенсі) роздільної гіперсфери для класу  $X_O$ . Максимум критерію функціональної

ефективності  $E_0^*$  визначає екстремальні значення радіусу  $d_0^*$  гіперсфери і системи полів контрольних допусків  $\{\delta_{k,i}^*\}$ . На другому етапі здійснюється

пошук глобального екстремуму критерію функціональної ефективності в процесі настроювання електронно-оптичної системи, який визначає, що  $X_S \in X_H^0$ , за умови  $A_H \leq I_L \leq A_B$ .

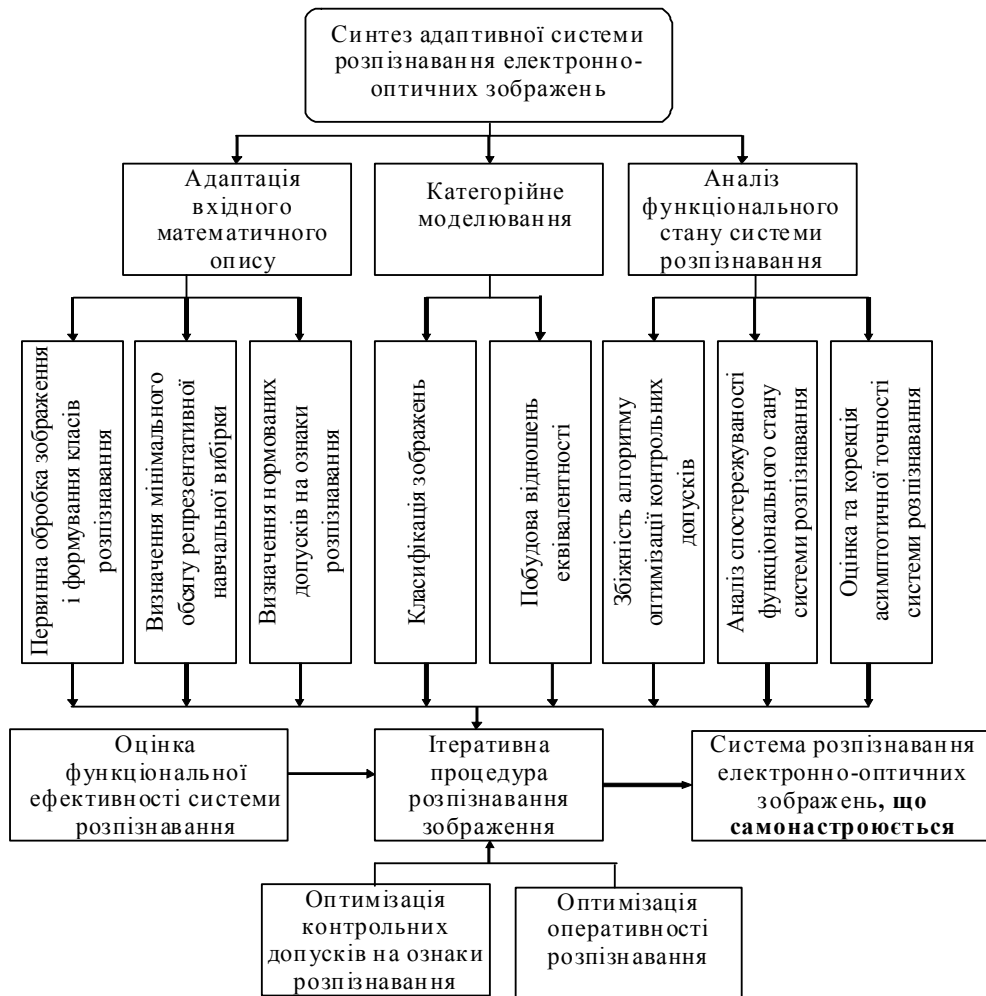
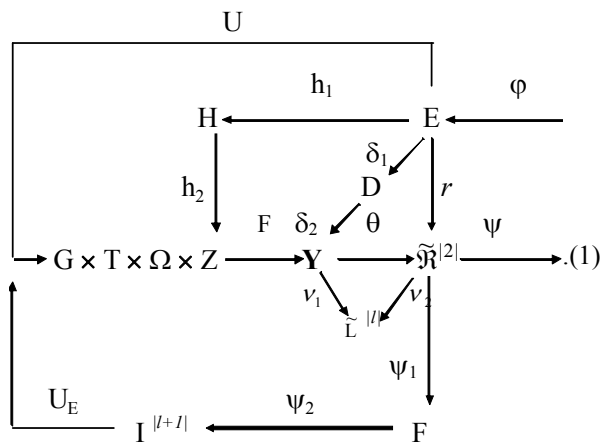


Рис. 1. Структурна схема методу адаптивного розпізнавання електронно-оптичних зображень

Категорійна модель синтезу адаптивної системи розпізнавання електронно-оптичних зображень подається у вигляді :



Тут універсум функціонально-статистичних випробувань задано як декартовий добуток  $G \times T \times \Omega \times Z$ , який відображається на вибірку

множину  $Y$  оператором виходу  $F: G \times T \times \Omega \times Z \rightarrow Y$ . Тут  $G$  – множина вхідних змінних;  $T$  – множина випробувань;  $\Omega$  – простір ознак розпізнавання;  $Z$  – множина функціональних станів електронно-оптичної системи. Оператор  $F: G \times T \times \Omega \times Z \rightarrow Y$  утворює вибірку множини  $Y$ , яка складається з реалізацій образу  $i \in$  навчальною матрицею  $\|y_{m,i}^{(j)}\|$ , де  $m = 1, 2$  – змінна класів  $X_0$  і  $X_S$ ;  $i$  – змінна числа рецепторів в рядку рецепторного поля;  $j$  – змінна числа реалізацій зображення.

В діаграмі (1) оператор  $\theta: Y \rightarrow \tilde{R}^{|2|}$  утворює нечітке розбиття  $\tilde{R}^{|2|}$ , а оператори  $v_1$  і  $v_2$  замикають комутативне кільце на нечітке покриття  $\tilde{L}^{|l|} = \{X_m^0\}$ . Оператор класифікації  $\psi: \tilde{R}^{|2|} \rightarrow I^{|l|}$  визначає перевірку основної статистичної гіпотези про належність реалізації навчальної матриці класу  $X_0$ , де  $l$  –

кількість статистичних гіпотез, які перевіряються. Принциповою відмінністю методу адаптивного розпізнавання електронно-оптичних зображень від відомих мінімально-дистанційних методів автоматичної класифікації є корекція в процесі навчання нечіткого розбиття  $\tilde{\mathfrak{H}}^{2l}$  шляхом ітераційної оптимізації параметрів навчання за інформаційним критерієм функціональної ефективності. Такими параметрами є радіуси роздільних гіперсфер і система контрольних допусків на значення рецепторів. Для обчислення критерію оператор  $\gamma: I^{l^2} \rightarrow \mathfrak{Z}^{l^2}$  шляхом оцінки прийнятих гіпотез  $\gamma_l, l=1,2$  формує множину точнісних характеристик  $\mathfrak{Z}^{l^2}$ , де  $q=l^2=4$  – кількість точнісних характеристик, а оператор  $\phi: \mathfrak{Z}^{l^2} \rightarrow E$  безпосередньо обчислює за ітераційною процедурою множину значень інформаційного КФЕ, який є функціоналом точнісних характеристик.

Ітераційний процес оптимізації геометричних параметрів розбиття  $\tilde{\mathfrak{H}}^{2l}$  реалізується оператором  $r: E \rightarrow \tilde{\mathfrak{H}}^{2l}$  шляхом пошуку максимуму критерію функціональної ефективності  $E_m^* = \max_{\{d\}} E_m(d)$ , де  $\{d\}$  – множина кроків навчання розпізнаванню реалізацій класу  $X_0$ . Ітераційний процес оптимізації системи контрольних допусків на ознаки розпізнавання, яка утворює множину  $D$ , реалізується оператором бієктивного відображення  $\delta: E \rightarrow D$ , а оператор  $\sigma$  відображає систему допусків  $D$  на вибіркочну множину  $Y$ , що обумовлює надалі можливість зміни значень бітової навчальної матриці  $\|x_{m,i}^{(j)}\|$ , яка формується в процесі пошуку максимуму критерію  $E_m$ .

Отже, оптимізація параметрів навчання здійснюється шляхом реалізації ітераційної процедури пошуку максимуму критерію  $E$  в кожному із контурів, які знаходяться в зворотному зв'язку діаграми (1).

Відсутність у функції інформаційного критерію функціональної ефективності електронно-оптичної системи розпізнавання взаємнооднозначності потребує знання робочої області її визначення. Обмеження такої області як зліва, так і справа задаються такими умовами:

$$P \left\{ \frac{n_i}{n} - \varepsilon_Q \leq p_i \leq \frac{n_i}{n} + \varepsilon_Q \right\} = 1 - Q, \quad (2)$$

де  $Q$  – рівень значущості.

Тут статистична похибка  $\varepsilon_Q = |p_i - \tilde{p}_i|$ , де  $\tilde{p}_i = n_i/n$  – емпірична частота знаходження значення  $i$ -ї ознаки в своєму контрольному полі допусків, визначається за формулою

$$\varepsilon_Q = \frac{\arg [\Phi(x) = 1 - Q/2]}{2\sqrt{n}}, \quad n > 1, \quad (3)$$

де  $\Phi(x)$  – функція Лапласа.

На прикладі оптичної людино-машинної системи розпізнавання – растрового електронного мікроскопа РЕМ-103-1 досліджено визначення системи нормованих допусків, що задає область відповідної системи контрольних допусків на ознаки розпізнавання, за умови збереження випадковості координат векторів-реалізацій образу і недопущення збігу еталонних векторів-реалізацій [2].

Визначення нижнього нормованого допуску  $A_H$  відбувається за правилом

$$A_H = d_1^* \cdot \chi,$$

$$\text{де } \chi = \frac{I_{J11} - I_{J12}}{d(x_1 \oplus x_2)}.$$

Тут  $I_{J11}, I_{J12}$  – значення управляючого параметра електронно-оптичної системи – струму об'єктивної лінзи, які визначають зображення «сусідніх» класів  $X_1^0$  і  $X_2^0$  відповідно;

$d(x_1 \oplus x_2)$  – міжцентрова кодова відстань.

Аналогічно здійснюється визначення верхнього нормованого допуску  $A_B$ .

Ідея оптимізації параметрів навчання полягає у наближенні глобального максимуму інформаційного критерію оптимізації до найбільшого його значення в області значень функції.

Досліджено вплив потужності алфавіту класів розпізнавання на асимптотичну достовірність електронно-оптичної системи розпізнавання, отримано коефіцієнти парного та множинного перетинів класів як у геометричній, так і в імовірнісній формах і встановлено їх аналітичний зв'язок з точнісними характеристиками процесу навчання [2].

Коефіцієнт парного перетину класів  $\eta_{m,l}$  розглядається як відношення повної ймовірності  $P_{np}$  неправильного розпізнавання  $X_m$  до повної ймовірності  $P_{pr}$  правильного розпізнавання  $X_l$ :

$$\eta_{m,l} = \frac{P_{np}}{P_{pr}} = \frac{p_m \alpha + p_l \beta}{p_m D_1 + p_l D_2},$$

де  $p_m, p_l$  – імовірності появи випадкових величин  $X_m$  і  $X_l$  відповідно.

У разі відсутності апріорної інформації доцільно взяти  $p_m = p_l = 0,5$ . Тоді

$$\eta_{m,l} = \frac{\alpha + \beta}{D_1 + D_2}.$$

Для дослідження впливу потужності абетки класів розпізнавання  $\{X_m^0\}^{\wedge}$  на достовірність рішень, що приймаються, доведено такі твердження.

*Твердження 1.* Нехай у бінарному просторі ознак розпізнавання  $\Omega$  потужності  $N$  здійснюється нечітке розбиття на  $M$  класів еквівалентності, в якому задано множину вершин еталонних векторів  $\{x_m\}$ , і відома кодова відстань між центрами сусідніх класів  $d(x_m \oplus x_l)$ , де  $x_l$  – сусідній (найближчий) еталонний вектор до  $x_m$ ;  $\oplus$  – логічна операція нері-

внзначності, тоді парний коефіцієнт перетину  $\eta_{m,l}$  залежить як від міжцентрової відстані класів розпізнавання, так і від середньоквадратичних відхилень реалізацій класів, що перетинаються.

*Твердження 2.* Збільшення парного коефіцієнта перетину класів розпізнавання при  $\sigma_m, \sigma_l = \text{const}$  призводить до зменшення достовірності рішення, що приймається.

Запропонований коефіцієнт перетину класів дозволяє оцінювати точність розпізнавання образів і визначати при збільшенні абетки класів розпізнавання її критичну потужність, яка потребує застосування завадозахищених методів прийняття рішень.

Для підвищення оперативності ітераційних процедур розпізнавання зображення із змінним кроком збільшення параметра оптимізації (струму об'єктивної лінзи) розглянуто застосування величини приросту радіуса контейнера за законом чисел р-Фібоначчі. Теоретично обґрунтовано та експериментально доведено, що тривалість нормалізації зображення для растрового електронного мікроскопа РЕМ-103-1 не перевищувала 5 с.

Класифікаційне настроювання електронно-оптичної системи розглядається як непряма задача навчання, що складається з таких етапів: обчислення на кожному кроці настроювання  $s$  інформаційної міри різноманітності  $E(s)$  між початковим  $X_0$  і поточним  $X_s^0$  класами; порівняння значення  $E(s)$  з попереднім; зміна залежно від результату порівняння управляючого параметра системи розпізнавання  $g_j$  – струму фокусуєної лінзи за ітераційним алгоритмом

$$g_{\xi}(s) = g_{\xi}(s-1) + \begin{cases} h_{\xi}(s), & \text{if } E(s) \geq E(s-1); \\ -h_{\xi}(s), & \text{if } E(s) < E(s-1), \end{cases}$$

де  $h_{\xi}(s)$  – крок зміни  $\xi$ -го параметра настроювання.

Процес нормалізації зображення закінчується, коли знайдено оптимальне значення  $\{g_{\xi}^*\}$ , що забезпечує максимально чітке зображення. При цьому оптимізація структурованих параметрів навчання здійснюється шляхом багатоциклічної ітераційної процедури пошуку глобального максимуму інформаційного КФЕ навчання системи в робочій області визначення його функції. Згідно з принципами редукції та квантовості подання знань на кожному кроці навчання здійснюються трансформація вихід-

ного розподілу реалізацій образу та його вписування в оптимальний контейнер, який відновлюється в радіальному базисі дискретного простору ознак розпізнавання. Така цілеспрямована нормалізація образів у процесі навчання дозволяє побудувати нечітке розбиття, яке максимізує інформаційну міру різноманітності для класів, що належать заданому алфавіту. При цьому на відміну від відомих методів автоматичної класифікації механізм підвищення ефективності машинного навчання системи за умов нечіткої компактності реалізацій образу здійснюється шляхом цілеспрямованої зміни значень ознак розпізнавання.

## Висновки

Удосконалено і реалізовано метод адаптивного розпізнавання електронно-оптичних зображень, що ґрунтується на прямій оцінці інформаційної спроможності системи за умов нечіткої компактності реалізацій образу й обмеження обсягу навчальної вибірки. Розроблений метод дозволив адаптувати вхідний математичний опис функціонального стану системи, що навчається, з метою побудови оптимального в інформаційному розумінні нечіткого класифікатора, який при достатній глибині оптимізації його просторово-часових параметрів функціонування забезпечує класифікацію функціональних станів системи розпізнавання з достатньо високою точністю за нечіткою навчальною матрицею (похибка 5%). Оцінка здійснювалася за результатами 50 прогонів алгоритму навчання автоматизованої системи розпізнавання електронно-оптичних зображень.

## Список літератури

1. Скаковская А.Н. *Функционально-статистический метод управления растровым электронным микроскопом / А.Н. Скаковская // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2007. – № 2(21). – С. 16-20.*
2. Соколов О.Ю. *Классификация изображений в контейнерному просторе признаков распознавания / О.Ю. Соколов, А.М. Скаковская // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2008. – № 1(31). – С. 50-52.*

Надійшла до редколегії 1.09.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.А.Борисенко, Сумський державний університет, Суми.

## МЕТОД АДАПТИВНОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

А.Н. Скаковская, О.С. Радивоненко

*Рассматривается метод адаптивного распознавания электронно-оптических изображений, повышающий эффективность функционирования системы распознавания путем классификационной настройки электронно-оптической системы без участия человека-оператора.*

**Ключевые слова:** электронно-оптическое изображение, распознавание, классификация.

## METHOD OF ADAPTIVE RECOGNITION OF ELECTRON-OPTICAL IMAGES

A.N. Skakovskaya, O.S. Radivonenko

*Automated data processing technology improvement and group of methods and models from the patterns recognition and fuzzy sets theories allow utilizing hardware-software complex that forms basis for researches of artificial intelligence systems synthesis.*

**Keywords:** electron-optical image, recognition, classification.